

# Quantum Effects on Diffusion Process in Heavy-Ion Fusion Reactions

著者	鷲山 広平
号	50
学位授与番号	2318
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/39377">http://hdl.handle.net/10097/39377</a>

氏 名・（本 籍）	わし やま こう へい 鷺 山 広 平
学 位 の 種 類	博 士（理 学）
学 位 記 番 号	理 博 第 2 3 1 8 号
学位授与年月日	平 成 19 年 3 月 27 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研 究 科，専 攻	東北大学大学院理学研究科（博士課程）物理学専攻
学 位 論 文 題 目	Quantum Effects on Diffusion Process in Heavy-Ion Fusion Reactions (重イオン核融合反応における拡散過程に対する量子効果)
論 文 審 査 委 員	(主査) 教 授 滝 川 昇 教 授 宮 瀬 晴 久 助教授 萩 野 浩 一，篠 塚 勉，大 槻 勤

## 論 文 目 次

1. Introduction
  2. Historical overview on superheavy elements
  3. Generalized Fokker-Planck equation
  4. Generalized Langevin equation
  5. Application to the compound nucleus formation process in the synthesis of superheavy elements
  6. Summary and concluding remarks
- 
- A. Probing surface diffuseness of nucleus-nucleus potential with quasielastic scattering at deep sub-barrier energies
  - B. Potential energy, inertia and friction tensors
  - C. Numerical simulation of Langevin equation

## 論 文 内 容 要 旨

Considerable experimental efforts have been devoted for several decades to synthesizing superheavy elements by heavy-ion fusion reactions. Since the evaporation residue cross sections for superheavy elements are extremely low, it is highly desirable to have reliable theoretical predictions of the appropriate combination of the target and projectile nuclei and of the optimum incident energy in order to design future experiments. A crucial subject in this context is to accurately describe the formation process, i.e., the shape evolution from the touching configuration of the two fusing nuclei to a compact compound nucleus by overcoming a potential barrier near the so-called conditional saddle point.

To this end, an approach using a diffusion model has been developed as one of the promising methods. The classical fluctuation-dissipation theorem, which holds at high temperatures, has been assumed in the approach to relate the diffusion coefficient to the friction coefficient. However, superheavy elements are systems stabilized by

quantum shell correction energies, so that they need to be synthesized at low excitation energies. Consequently, quantum effects should be carefully examined for the reactions to synthesize superheavy elements.

In this thesis, we develop a quantum diffusion theory which can be applied to the diffusion process along a potential barrier at low temperatures and discuss quantum effects in the formation process of a heavy compound nucleus such as superheavy elements. The quantum fluctuation due to the finite curvature of the potential barrier and the memory effect are the two aspects of quantum effects in our theory. We first derive the Fokker-Planck equation with non-Markovian transport coefficients including the quantum fluctuation. Using a simple model of a parabolic potential barrier and constant mass and friction parameters, we show that the quantum diffusion approach gives a larger probability to overcome a one-dimensional potential barrier than that calculated by assuming the classical fluctuation-dissipation theorem at low temperatures.

We then reformulate the quantum diffusion theory in the form of the Langevin equation approach with a colored noise. We then apply it to the simplified one-dimensional barrier passing problem that has been studied in the Fokker-Planck equation approach, and show the equivalence of the two approaches. The potential barrier, the mass and friction parameters in realistic situations are much more complicated than those in the simple model. The Langevin equation approach is much more easily handled for such situations. We explain a method to numerically solve the Langevin equation with a colored noise random force by using the Monte Carlo simulation.

In order to elucidate quantum effects in the actual compound nucleus formation processes in heavy-ion reactions, we analyze the mass symmetric  $^{100}\text{Mo} + ^{100}\text{Mo}$  and  $^{110}\text{Pd} + ^{110}\text{Pd}$  reactions, and the  $^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu}$  and  $^{70}\text{Zn} + ^{208}\text{Pb}$  reactions, which have been used to synthesize superheavy elements. Performing numerical simulations and comparing the results with and without quantum effects, we show that the quantum effects enhance the compound nucleus formation probability at low excitation energies irrespective of the energy dissipation prior to the touching configuration of the colliding nuclei for the mass symmetric reactions. On the other hand, the quantum effects affect the  $^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu}$  and  $^{70}\text{Zn} + ^{208}\text{Pb}$  reactions in a different way. The quantum effects reduce the compound nucleus formation probability when the energy dissipation prior to the touching configuration is small, and hence there remains a certain amount of kinetic energy in the relative motion at the touching configuration.

We also analyze the mass distribution of quasi-fission fragments using the two-dimensional Langevin equation approach. Due to the large friction and inertia for the mass partition, the mass transfer does not occur significantly in the vicinity of the touching configuration. However, quantum effects are noticeable in the yield around  $^{208}\text{Pb}$  created by a large mass transfer in the  $^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu}$  reaction.

## 論文審査の結果の要旨

本論文は、超重元素生成反応など重い原子核同士の重イオン核融合反応を拡散過程として記述する際の量子効果を議論した論文である。超重元素の実験室での生成は、世界中の幾つかの研究機関で精力的に行われている興味深い挑戦である。しかし、生成断面積が極めて小さく、その実現のためには、理論による最適な散乱系や、衝突エネルギーの予言が望まれる。その際、重要な課題の一つは、入射核と標的核がクーロン障壁を越えて接触点に達した後、核分裂に対する所謂条件付障壁を越え複合核に至る迄の過程を正しく記述し、複合核形成の確率を定量的に精度良く評価することである。その一つの方法として、ランジェバン方程式を用いる揺動散逸理論が開発されてきた。それらの先駆的理論では、拡散係数を高温領域で成り立つ古典的な揺動散逸定理に基づいて摩擦力と関連付けている。しかし、超重元素は量子的な殻効果で安定化された系である為、量子効果が重要な役割を演じることが予測される。それに関連して、本論文では、まず、量子効果を取り入れた拡散理論を、Fokker Planck 方程式およびランジェバン方程式を用いる二つの方式で定式化した。量子効果の具体的内容は、量子揺らぎ及び非マルコフ効果である。更に、開発した理論を、対称系として、 $^{100}\text{Mo}+^{100}\text{Mo}$  および  $^{8110}\text{Pd}+^{110}\text{Pd}$  反応、非対称系として  $^{48}\text{Ca}+^{244}\text{Pu}$  反応、及び、 $^{70}\text{Zn}+^{208}\text{Pb}$  反応に適用し、量子効果が低エネルギー衝突における複合核生成断面積に重要な影響を及ぼすこと、対称系では、接触点にいたる前のエネルギー散逸量によらず、量子効果によって複合核の生成断面積が増幅すること、非対称系では、接触点にいたる前のエネルギー散逸が少ない場合は、量子効果によって複合核生成の確率が抑制されることを明らかにした。更に、量子効果は、いわゆるquasi-fissionの断面積にも有意な影響を及ぼすことを明らかにした。

これら全ての結論は本研究で初めて明らかにされたものであり、超重元素生成反応の研究にとって極めて重要な知見である。非マルコフ効果を表現するcolored noiseの場合のランジェバン方程式を数値的に解く計算コードを作成し、原子核反応に適用したことも、先駆的試みとして高く評価される。

本論文は、鷺山 広平が自立して研究活動を行うに必要な高度な研究能力と学識を有している事を示している。従って、鷺山広平提出の博士論文は、博士（理学）の学位論文として合格と認める。